

# 문풀 내 압력 변동에 대한 POD 분석

이상봉<sup>1</sup>·한범우<sup>1</sup>·박동우<sup>1,†</sup>·안유원<sup>2</sup>·고석천<sup>1</sup>·서흥원<sup>1</sup>  
현대중공업 선박연구소<sup>1</sup>  
현대중공업 기본계획부<sup>2</sup>

## Proper Orthogonal Decomposition of Pressure Fluctuations in Moonpool

Sang Bong Lee<sup>1</sup>·Bum Woo Han<sup>1</sup>·Dong Woo Park<sup>1,†</sup>·You Won Ahn<sup>2</sup>·Seok Cheon Go<sup>1</sup>·Heung Won Seo<sup>1</sup>  
Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.<sup>1</sup>  
Initial Design Department, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.<sup>2</sup>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Experiments of circulating water channel and two dimensional numerical simulations were performed to investigate the fluctuating characteristics of pressure in moonpool. Based on the quasi-two dimensional characteristics of pressure fluctuations disclosed by the spatial cross-correlations, the numerical results showed qualitatively good agreement with experimental data. Proper orthogonal decomposition was employed to the spatial distributions of pressure fluctuations in order to find the first and second modes of fluctuations. The first mode of pressure fluctuations showed that the fluctuating characteristics of pressure were related to the behaviors of vortical structures. The velocity fluctuations were conditionally averaged to make clear that the coherent structures were responsible for the pressure fluctuations in moonpool.

**Keywords** : Moonpool(문풀), Self-sustained oscillation(자력진동), Proper orthogonal decomposition(적합직교분해법)

## 1. 서론

세계적으로 산업 및 공업이 발전함에 따라 석유, 천연가스 등의 사용량이 증가하고 있고, 경제성이 없어 무시되어 왔던 군소의 한계 유전(marginal field)이나 심해 유전의 개발에 대한 관심이 고조되고 있다. 이러한 유전을 개발하기 위해 최근에는 첨단 시추 장비를 탑재하고 자체 동력으로 항해할 수 있도록 일반 선박과 동일한 형태로 제작된 드릴쉽이 개발되어 해저 시추에 사용된다. 드릴쉽은 시추 파이프를 해저면으로 내려 보내기 위해 선체 중심부에 수직으로 관통된 문풀(moonpool)을 구비하고 있다. 상기 문풀은 열린 공동의 형상으로 인해 전단층(shear layer), 와류(vortex) 그리고 자유 수면이 상호 작용하여 드릴쉽의 항해 시에 매우 강한 유동 교란을 야기할 수 있다. 이러한 유동 교란은 문풀 내 자유 수면을 불안정하게 하고 저항의 시간 변동을 증가시켜 드릴쉽의 저항 성능을 저하시킨다.

문풀 내 유동 교란이 발생하는 이유는 전단층의 박리와 발달에 따른 와류 생성 및 충돌이 자유 수면의 교란으로 이어지는 자력진동(self-sustained oscillations) 특성 때문이다. 기존 연구는 이러한 자력진동의 특성을 밝히기 위해 주로 문풀의 기하학적 형상에 따른 내부 유동의 고유 주기 및 저항/자항 성능의 변화에 초점을 맞추고 있다. 국내에서는 작업단의 높이 및 형상 변화가 저

항 성능에 미치는 영향(Kim, et al., 2006) 및 문풀 내부 유동 제어 통한 저항 변화(Choi, et al., 2011), 문풀을 갖춘 드릴쉽의 자항 성능(Yoo & Choi, 2004)에 대한 연구가 실험적으로 연구된 바 있다. 문풀 내에서 발생하는 자력진동에 대한 이론적 접근을 통해 문풀의 길이 및 폭에 따른 고유 주기를 추정하는 연구도 해외에서 수행되었다(Molin, 2001).

이러한 다양한 연구에도 불구하고 문풀 내 유동 현상이 매우 복잡하여 실험 및 수치 결과에 대해 체계적으로 분석할 수 있는 방법이 여전히 제한적이다. 본 연구의 목적은 문풀 내부의 압력 변동을 효과적으로 분석할 수 있는 방법을 제시하고, 상기 방법을 통해 압력 변동을 야기하는 유동 구조를 밝히는 것이다. 이를 위해 2차원 수치 해석과 회류 수조를 이용한 실험을 수행하였다.

## 2. 실험 방법 및 수치 해석 기법

### 2.1 실험 방법

본 실험에서 사용한 회류 수조는 관측부가 폭 2.0m, 깊이 1.2m, 길이 4.2m인 실험 장비이며, 최고 속도 2.0m/s의 회류 속도를 낼 수 있다. 대상선은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 문풀을 구비한 더미(dummy) 선형이다. 대상선의 길이는 3.3m이며, 폭은

1.2m이다. 선체 압력에 따른 자세 변화가 일어나지 않도록 선체의 선수부와 선미부를 회류 수조 상단 구조물에 완전 고정하였다.

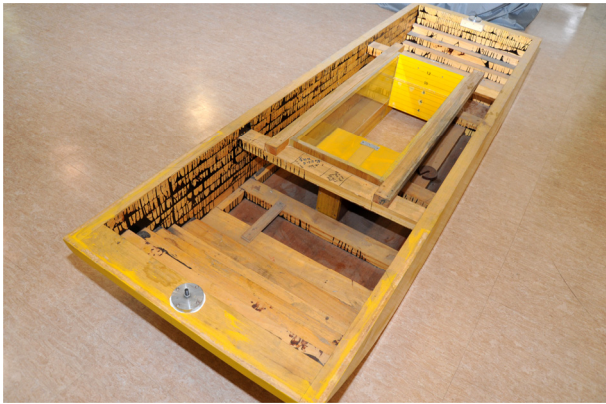


Fig. 1 Dummy ship with moonpool

상기 대상선을 사용하여 문풀의 후류 수직 벽면에서 압력을 측정하였다. 문풀의 길이( $L$ )와 폭( $B$ )은 각각 0.7744m, 0.4426m이며, 압력 측정을 수행한 위치는 Fig. 2와 같다. 자유 수면이 위치하는 흘수는 0.3284m이다. 유동은 오른쪽에서 왼쪽으로  $-x$  방향으로 유입되며, 유속은  $V_M = 1.244\text{m/s}$ 이다. Fig. 2(a)에서 보듯이 문풀의 후미 수직 벽면( $x = 0$ )에서 압력을 측정하였으며, 측정점에 대한  $y$  방향과  $z$  방향 위치는 Fig. 2(b)와 같다. 각 측정점의 좌표는 Table 1에 나타내었다. 압력 측정 시 유동장이 평형 상태에 도달하도록 충분한 시간이 지난 이후 초당 100개의 표본 추출 비율(sampling rate)로 30초 동안 압력 데이터를 저장하였다. 측정에 사용된 압력센서는  $\pm 250\text{mmH}_2\text{O}$ 에서 교정시험을 수행하였고 선형성을 확인하였다. 다채널 증폭기(multichannel amplifier)를 사용하여 8개의 압력센서 신호를 동시 처리하였다.

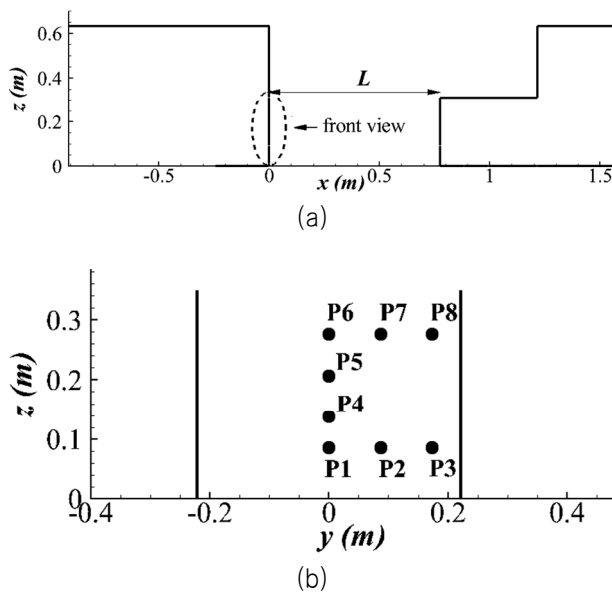


Fig. 2 Measurements of pressure on the trailing wall of moonpool

증폭기와 A/D converter의 경우 독일 HBM사의 장비를 사용하였으며, A/D 분해능은 24bit이다.

Table 1 Locations of pressure measurement

	$(x, y, z)$
P1	(0, 0, 0.0864)
P2	(0, 0.0864, 0.0864)
P3	(0, 0.1729, 0.0864)
P4	(0, 0, 0.1383)
P5	(0, 0, 0.2074)
P6	(0, 0, 0.2766)
P7	(0, 0.0864, 0.2766)
P8	(0, 0.1729, 0.2766)

\* 문풀의 후류 끝단 중앙점을  $(x, y, z) = (0, 0, 0)$ 으로 기준함. 단위는 m

## 2.2 수치 해석 기법

수치 해석 코드는 FLUENT를 사용하여 자유 수면을 고려한 2차원 다상 유동 수치 해석을 수행하였다. 입구 경계 조건은 압력 입구 조건(pressure-inlet)을 사용하였다. FLUENT에서 압력 입구 조건은 전압력(total pressure)의 값을 정의함으로써 자유 수면이 포함된 수치 해석에서 정수압(hydrostatic pressure)을 고려할 수 있는 경계 조건이다. 입구 영역에서의 속도는 동압(dynamic pressure)을 통해 전압력에서 고려할 수 있다. 또한 자유 수면에 따른 정수압을 고려하기 위해 출구에서도 압력 출구 조건 (pressure-outlet)을 사용하였다. 위쪽 면과 아래쪽 면은 대칭(symmetry) 경계 조건으로, 경계면에 수직인 방향에 대한 속도 성분은 0으로 정의되며 경계면과 평행한 속도 성분 및 스칼라(scalar) 물리량에는 대칭성이 적용되는 방법이다. 난류 모형은 높은 Reynolds수를 갖는 척도임을 고려하여 realizable  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다. 2차원 수치 해석에서 수행한 속도 및 문풀 형상 조건은 회류 수조에서 수행한 조건과 동일하다. 단 수치 해석에서 사용한 계산 영역은 회류 수조와 달리 문풀 형상 근처에 국한되어 있으므로 실험보다 경계층의 두께가 얇게 형성될 수 있다. 수치 해석에서 사용한 계산 영역은 Fig. 3에서 확인할 수 있다. 입구 및 출구 영역은 문풀의 전류 및 후류 끝단에서 1m만큼 떨어져서 위치한다( $L_{inlet} = L_{outlet} = 1\text{m}$ ). 계산 영역에 따른 경계층 발달이 압력 변동량에 미치는 영향을 분석하기 위해  $L_{inlet} = 0.5\text{m}, 2\text{m}$ 인 경우에 대해 수치 해석을 수행하였으며, 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 보듯이 입구 영역의 길이에 따라 압력 변동량이 다소 차이가 있으나 전반적인 경향은 동일하다.

최소 격자 간격은 모형 척도 기준으로 0.002m이며, 정렬 격자 계로 구성하였다. 사용된 전체 격자는 130,186개이며, 초기 조건의 영향을 없애기 위해 40초 이후의 시간부터 유동장에 대한 분석을 시작하였다. 격자의 수렴성 및 불확실성 해석을 위해 각 방향으로 격자 크기를  $\sqrt{2}$  비율로 줄이거나 늘이면서 P1에 작용하

는 압력을 분석하였다 (Wilson, et al., 2001). Table 2는 각 격자에서 해석된 압력 변동(pressure fluctuations)의 평균평방근(root mean square, RMS)를 보여주며, 실험값과의 비로 나타내었다.

입력 변동의 RMS에 대한 불확실성 해석 결과는 Table 3과 같다. 표에서 보듯이 압력 변동의 RMS에 대해 수렴비 (convergence ratio, rG)가 0과 1사이에 존재하므로 단조 수렴성을 보여준다. Corrected factor (cG)가 1에 근사하다고 볼 때 압력 변동의 RMS 수정치는 실험값 대비 2% 이내의 오차를 가지며, 격자에 따른 불확실성은 6.5%로 추정할 수 있다. 따라서 격자의 수렴성 및 불확실성이라는 측면에서 본 연구에서 사용한 130,186개의 2차원 격자는 압력 변동의 특성을 추정하기에 충분한 것으로 보인다.

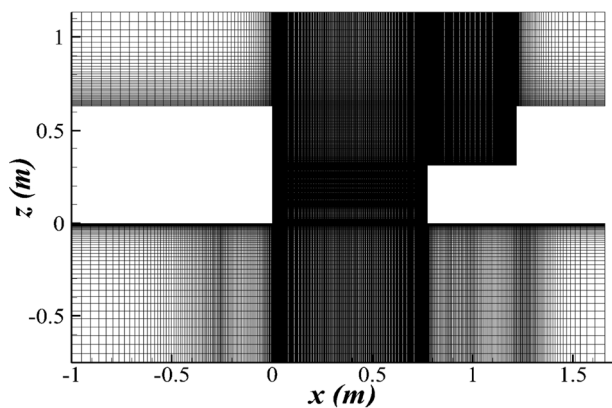


Fig. 3 Calculation domain

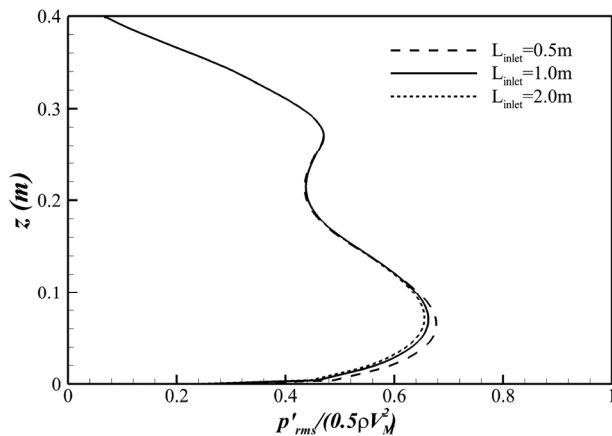


Fig. 4 Effects of entrance length on pressure fluctuations

Table 2 Numerical results of pressure (P1)

No. of Grid	65,093	130,186	260,372
RMS	0.7124	0.8787	0.9473

Table 3 Verification of RMS values

	r <sub>G</sub>	p <sub>G</sub>	c <sub>G</sub>	U <sub>G</sub>	corrected
RMS	0.4126	2.55	1.424	6.52%	1.0159

### 3. 결과

#### 3.1 상호 상관도(cross-correlation)

##### 3.1.1 입력 분포의 공간적 상관도

실험의 각 계측점에서 측정된 압력 변동 간의 상관도를 분석하여 Table 4에 나타내었다. P1~P8은 각 계측점을 의미하며, 상관도  $C_{ij}$ 는 아래의 관계식으로부터 계산하였다.

$$C_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^M (p_i^{(n)} - \bar{p}_i)(p_j^{(n)} - \bar{p}_j)}{\sigma_i \sigma_j} \quad (i, j = 1 \sim 8) \quad (1)$$

여기서  $M$ 은 전체 데이터 수,  $\sigma_i$ 는  $i$  위치에서의 압력 표준편차,  $\bar{p}_i$ 는  $i$  위치에서의 압력 평균값,  $P_i^{(n)}$ 은  $i$  위치에서의  $n$  번째 압력값을 의미한다. 상기 관계식에 의해  $C_{ij}$ 는  $P_i$  위치와  $P_j$  위치에서 계측한 압력 변동의 상관도를 나타낸다.  $C_{12}$ ,  $C_{13}$ ,  $C_{23}$ ,  $C_{67}$ ,  $C_{68}$ ,  $C_{78}$ 은 문풀 내부 유동의  $y$  방향 상관도를 나타내는 값으로써 문풀 내부 압력 분포의 특성을 파악하는데 활용할 수 있다.  $y$  방향 상관도가 1에 가까울수록 압력 분포가 2차원적 특성을 보이며, 0에 가까울수록 압력 분포가 3차원적 특성을 나타낸다. 즉 문풀 내부 유동을 2차원으로 수치 해석하는 것에 대한 타당성과 향후 문풀 실험에서  $y$  방향 압력 계측이 필요한지에 대한 근거가 될 수 있다.

Table 4 Cross-correlation coefficients of pressure fluctuations

$C_{ij}$	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
P1	1.000	0.761	0.720	0.841	0.736	0.603	0.621	0.632
P2	-	1.000	0.744	0.806	0.724	0.587	0.601	0.619
P3	-	-	1.000	0.780	0.661	0.523	0.544	0.557
P4	-	-	-	1.000	0.816	0.701	0.700	0.719
P5	-	-	-	-	1.000	0.888	0.886	0.883
P6	-	-	-	-	-	1.000	0.953	0.938
P7	-	-	-	-	-	-	1.000	0.950
P8	-	-	-	-	-	-	-	1.000

Table 4에서 보듯이  $y$  방향 상관도가 모두 0.7 이상을 보여주며, 특히 자유 수면 근처( $C_{67}$ ,  $C_{68}$ ,  $C_{78}$ )에서는 상관도가 0.9 이상으로 압력이 2차원으로 분포하고 있음을 알 수 있다.  $C_{14}$ ,  $C_{15}$ ,  $C_{16}$ ,  $C_{45}$ ,  $C_{46}$ ,  $C_{56}$ 으로부터 추정할 수 있는  $z$  방향 상관도 역시 0.6 이상으로 높다. 즉 와류의 충돌로 인해 특정 지

역에서 압력이 높아질 경우 전체적으로 주변 압력이 동시에 높아지는 특성을 보여준다는 뜻이다. 결과적으로 문풀 내부의 압력 분포는 강한 2차원적 특성을 보여주므로 2차원 수치 해석을 통해 압력 분포에 대한 분석이 가능함을 알 수 있다. 또한 문풀의 자유 수면에서 목측(eye observation)으로 관측 가능한 파형에 근거해 볼 때 문풀의 측면에 가까운 영역을 제외하고는 전반적으로 준 2차원(quasi-two dimension)으로 볼 수 있다.

### 3.1.2 실험 및 수치해석 결과 비교

실험에서 계측한 압력 변동을 2차원 수치해석 결과와 비교한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 가로축은 압력 변동의 RMS를 무차원화한 값이며, 세로축은 문풀 후류 수직 벽면의 높이이다. 실선은 수치 해석 결과이며, 검은색 원은 실험에서 계측한 결과이다. 그림에서 보듯이 압력 변동이 큰 위치(P1, P6)에서는 계산값이 실험값보다 다소 낮게 예측되고 있다. 그러나 본 연구의 목적이 압력 변동의 공간적 분포에 대한 분석 방법을 제시하는 데 있으므로, 정성적으로 실험과 유사한 공간 분포를 보여준다는 것에 의미를 부여할 수 있다.

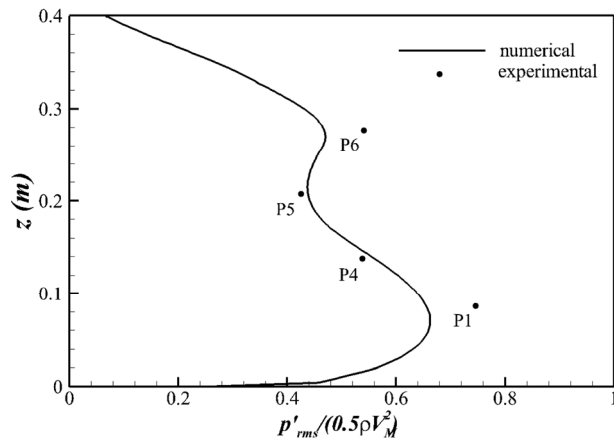


Fig. 5 Comparison of pressure fluctuations between numerical and experimental results

### 3.2 압력 분포 및 유동 구조

문풀 내부 유동 특성을 파악하는데 있어 본 연구에서 수행한 2차원 수치 해석 결과가 정성적으로 실험과 유사한 결과를 제시할 수 있는 바, 수치 해석 결과를 이용하여 압력 변동의 물리적 특성을 분석하였다. Fig. 6은 기본 문풀 형상의 후류에 위치한 수직 벽면에 작용하는 압력 변동의 시공간적 특성을 나타낸다.  $D$ 와  $L$ 은 각각 흘수와 문풀의 길이를 의미한다. Fig. 6(a)에서 가로축과 세로축은 각각 시간과 문풀의  $z$  방향 공간 좌표를 무차원화한 값이다. 파란색은 압력 변동이 (-)인 상태이며, 빨간색은 (+)인 상태이다. 압력 변동의 대표적인 공간 분포를 그려보면 Fig. 6(b)와 같다. 그림에서 보듯이 압력 변동의 상당량은 자유 수면 근처보다 선저( $z/D=0$ )로부터 문풀의 깊이의 절반( $z/D=0.5$ ) 사

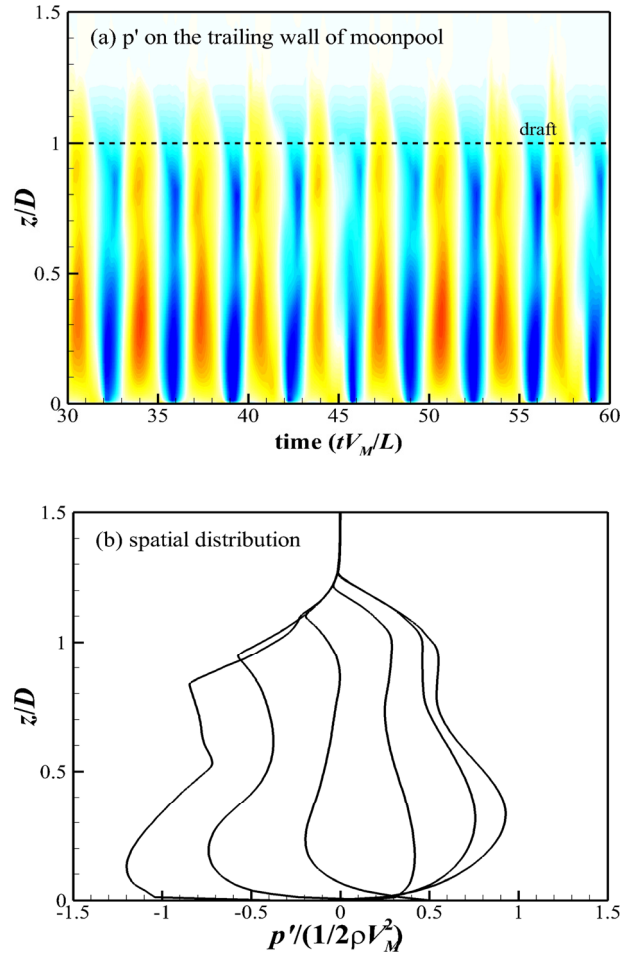


Fig. 6 Temporal and spatial distributions of pressure fluctuations

이에서 발생함을 알 수 있다.

압력 변동의 대표적인 공간 분포에 대해 분석하기 위해 적합 직교 분해법(proper orthogonal decomposition, POD)을 적용하였다. POD 방법은 열린 공동 내 자여 진동의 유동 특성을 효과적으로 밝힐 수 있는 방법으로 기존 연구에서 검증된 바 있으며 실험 결과에도 적용 가능함을 보인 바 있다(Lee, et al., 2008). POD 방법은 계산 방법에 따라 공간적 상호 상관도(spatial cross-correlations)를 사용하는 방법과 표본 분포를 사용하는 방법으로 나눌 수 있다. 어느 방법을 적용하든 결과는 동일하므로 본 연구에서는 표본 분포를 사용하는 방법을 적용하였다. 적용한 POD 방법에 대해 간략히 소개하면 아래와 같다. 시공간의 함수로 나타나는 압력 변동을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p'(z, t) = \sum_{m=1}^M \mu_m \phi_m(t) \Psi_m(z), \quad (2)$$

$$\int_{\Omega} \Psi_i(z) \cdot \Psi_j(z) dz = \delta_{ij}$$

여기서  $\Psi_m$ 은 압력 변동의 공간 분포에 대한 직교 특성을 갖

는 기저 분포이며 공간상의 모드라는 개념으로 설명할 수 있다.  $\mu_m$  은 기저 분포에 해당하는 고유치이며  $\phi_m$  은 각 기저 분포의 시간 계수이다. POD는 이러한 기저 분포를 찾는 방법으로 고유치가 각 모드의 기여도를 나타내므로 고유치가 가장 큰 모드를 찾을 수 있다면 압력 변동을 야기하는 압력 분포의 특성을 분석할 수 있다. 이는 마치 시간 신호에 Fourier transform을 적용하여 시간 신호에 가장 기여도가 높은 주파수를 분석해 내는 것과 같은 원리이다. 각 기저 분포를 얻기 위해 다음과 같은 kernel 및 상관 관계 함수 R을 구성한다.

$$K(z, \zeta) := \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M p'^i(z) p'^i(\zeta), \quad (3)$$

$$R\Psi(x) := \int_{\Omega} K(z, \zeta) \Psi(\zeta) d\zeta$$

여기서  $\zeta$  는  $z$  와 동일한 공간 좌표로 다른 시간에서의 압력 변동의 분포에서 사용되는 공간 좌표계이며,  $\Omega$  는 POD를 적용하는 계산 영역을 의미한다.  $M$  은 각 시간에서 압력 변동에 대한 공간 분포 표본의 개수이다.  $p'^i$  는 시간에 따른  $i$  번째 공간 분포 표본을 의미한다. 압력 변동의 상관 관계 함수 R은 아래와 같은 식으로 구성된다.

$$\begin{aligned} (R\Psi, \Psi) &= \int_{\Omega} R\Psi(z) \Psi(z) dz \\ &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \int_{\Omega} \int_{\Omega} \Psi(z) p'^i(z) p'^i(\zeta) \Psi(\zeta) d\zeta dz \\ &= \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |(p'^i, \Psi)|^2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$R\Psi(z) = \int_{\Omega} K(z, \zeta) \Psi(\zeta) d\zeta = \lambda \Psi(z), \quad \|\Psi\| = 1 \quad (5)$$

상기 관계식에 kernel 관계식을 대입하면 아래와 같은 고유치 문제로 귀결된다.

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^M \left[ \sum_{k=1}^M \left( \frac{1}{M} \int_{\Omega} p'^i(\zeta) p'^k(\zeta) d\zeta \right) a_k \right] p'^i(z) \\ = \sum_{i=1}^M \lambda a_i p'^i(z) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $\lambda$  는 상기 문제에서 구해진 고유치이며, 각 기저 분포의 기여도를 의미한다. 한편 기저 분포는 다음의 관계식으로부터 계산할 수 있다.

$$\Psi(z) = \sum_{i=1}^M a_i p'^i(z) \quad (7)$$

본 고유치 문제가 의미하는 바는  $M$  개의 독립된 시공간 분포가 존재할 경우 각 분포의 상관 관계 계수(cross-correlation coefficient)로 이루어진  $M \times M$  행렬에 대한 고유치와 고유 벡터로부터 공간 분포를 결정하는  $M$  개의 직교 모드를 구할 수 있음을 뜻한다.

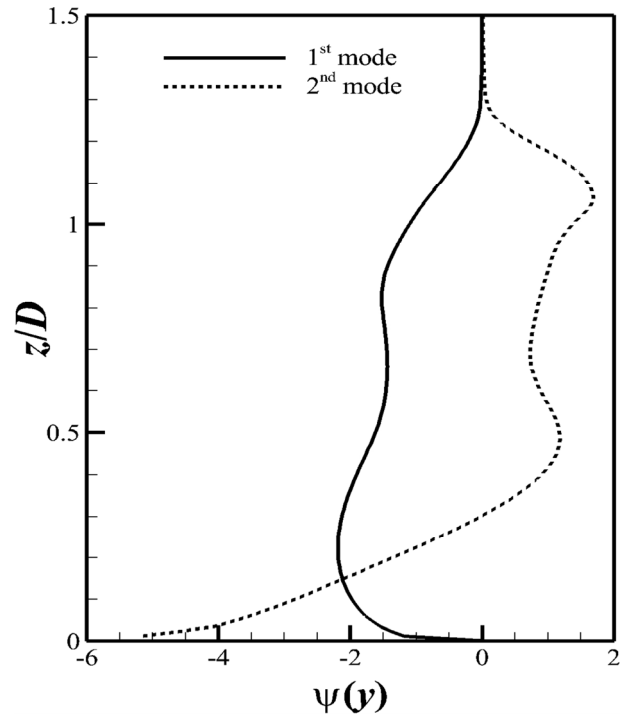


Fig. 7 Spatial modes of pressure fluctuations

Table 5 Modal contributions to pressure fluctuations

	1 <sup>st</sup> mode	2 <sup>nd</sup> mode
Contribution	95.5%	2.72%

상기 POD 기법을 통해 구해진 압력 변동의 공간 분포에 대한 1<sup>st</sup> 모드와 2<sup>nd</sup> 모드를 Fig. 7에 나타내었고 각 모드에 대한 기여도를 Table 5에 정리하였다. 표에서 보듯이 1<sup>st</sup> 모드가 전체 압력 변동에서 차지하는 기여도는 95.5%이며, 1<sup>st</sup> 모드와 2<sup>nd</sup> 모드가 차지하는 누적 기여분은 98%가 넘는다. 즉 1<sup>st</sup> & 2<sup>nd</sup> 모드가 전체 압력 변동을 대표하는 공간 분포라고 볼 수 있다. 그림에서 실선으로 표시한 1<sup>st</sup> 모드는 압력 변동의 시공간 분포에서 살펴본 바와 같이 선저( $z/D = 0$ )로부터 흡수의 절반( $z/D = 0.5$ ) 사이에서 강한 변동을 보여준다.

1<sup>st</sup> 모드에 해당하는 유동구조를 분석하기 위해 조건부 평균(conditional averaging)을 적용하였다. 기저 분포가 직교성을 지니므로 다음 관계식으로부터 조건부 평균을 취할 수 있다.

$$a_m(t) = \mu_m \phi_m(t) = \int_{\Omega} p'(z, t) \Psi_m(z) dz \quad (8)$$

$$\langle u' | a_m(t) \geq \alpha_m \rangle = u'_m(\vec{x}) \quad (9)$$

여기서  $a_m$ 은 각 모드의 시간 계수를 나타내므로 계수가 충분히 클 때만 조건부 평균을 취하면 각 모드에 대한 유동 구조를 분석할 수 있다.

1<sup>st</sup> 모드에 해당하는 유동장의 조건부 평균 결과는 Fig. 8과 같다. 벡터는 속도 변동을 나타내며, 파란색과 붉은 색은 각각 음과 양의 압력 변동을 의미한다. 와류의 특성을 고려할 때 음의 압력 변동이 나타나는 위치에 와류가 존재하며, 양의 압력 변동이 나타나는 위치에는 와류에 의해 야기된 회전류(induced flow)가 존재한다고 보는 것이 타당하다. 그림에서 보듯이 문폴의 전류 끝단에서 박리된 와류가 전단층을 따라 충분히 발달한 이후 문폴의 후류 끝단에 충돌하는 유동 상태이다.

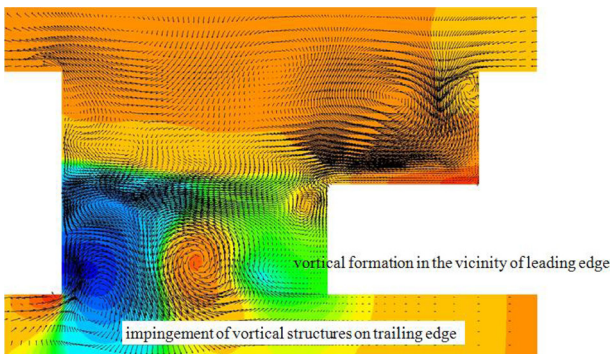


Fig. 8 Conditionally averaged field of velocity and pressure fluctuations corresponding to 1<sup>st</sup> mode

보다 자세한 관찰을 위해 문폴의 상류 끝단에서 박리된 와류의 중심을 추적하여 Fig. 9에 나타내었다. 와류의 중심을 찾기 위해 Jeong and Hussain (1995)이 제시한  $\lambda_2$  방법을 적용하였다. 전단을 전달 방정식(strain-rate transport equation)에서 나타나는 압력의 헤시안(pressure Hessian) 행렬은 압력의 국소 최저/최고에 대한 정보를 내포하고 있는데, 전단을 전달 방정식에서 비정상 비회전성(unsteady irrotational) 및 점성(viscous) 효과를 제거할 경우 국소적인 전단율(strain-rate)과 와도(vorticity)의 분포로 이루어진 3차원 대칭 텐서(tensor) 및 음의 압력 헤시안 분포가 남는다. 입력이 국소 최저를 이룰 경우 음의 압력 헤시안 분포는 두 개의 음의 고유치(eigenvalue)를 갖게 되므로,  $\lambda_2$  방법은 전단율과 와도의 분포로 이루어진 3차원 텐서의 고유치 부호를 통해 와류를 정의하는 것이다.

그림에서 빨간색 점으로 표시된 위치가 와류의 중심점을 나타내며, 시간에 따라 누적된 상태를 보여준다. 그림에서 보듯이 대부분의 와류는 path 2를 따라 이동하며 와류의 병합(vortical merging)

이 발생하여 와류의 크기가 크고 강도 역시 강한 상태에서 문폴 후류의 끝단에 충돌하는 특성을 보여준다. 다만 일부는 path 1을 통해 이동하며 와류의 강도가 약해진 상태로 충돌하거나 path 3를 통해 이동하며 문폴 내부로 유입되어 사라지는 거동을 보여준다. 즉 문폴에 작용하는 압력 변동의 상당 부분은 자유 수면의 변동에서 기인하는 것이라기 보다 문폴의 전류 끝단에서 박리된 와류가 문폴의 후류 끝단에 충돌하는 유동 현상 때문이다.

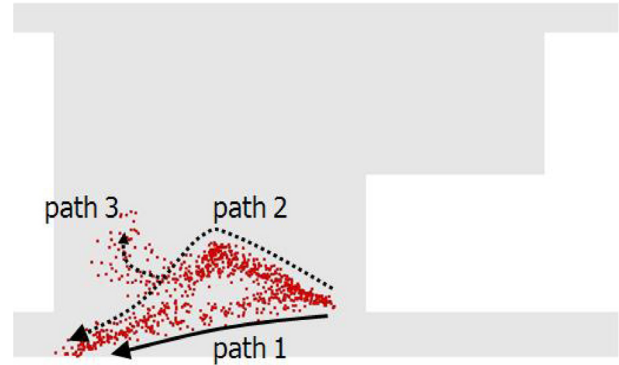


Fig. 9 Trajectory of vortical structures

### 3.3 입력 측정 위치의 대표성

압력 변동이 와류의 생성, 발달 및 충돌과 밀접한 상관 관계가 있기 때문에 문폴의 후류 벽면에서 측정된 압력값이 대표성을 갖기 위해서는 이러한 와류의 충돌을 적절히 모사할 수 있는 위치에서 압력 측정이 이루어졌느냐를 평가하여야 한다. 압력 변동의 1<sup>st</sup> & 2<sup>nd</sup> 모드를 살펴볼 때 본 연구에서 사용하고 있는 문폴 형상에서 압력 측정의 적절한 위치는 선저로부터 문폴 깊이의 1/5 ~ 1/4에 해당하는  $z/D = 0.2 \sim 0.25$  정도로 볼 수 있다. 따라서 본 실험에서 고려된 8개의 측정 위치 중에서 와류의 충돌 현상을 물리적으로 가장 잘 측정할 수 있는 위치는  $z/D = 0.263$ 에 설치된 P10이라고 할 수 있다. 또한  $z$  방향의 압력 분포를 얻기 위해 본 실험에서와 같이  $z$  방향으로 2점 이상에서 압력 측정이 이루어져야 한다.

## 4. 결론

문폴 내부의 압력 변동에 대한 연구를 위해 회류 수조 실험에서 압력을 측정하였으며 2차원 수치 해석을 수행하였다. 실험에서 측정한 압력의 공간 상관도를 분석한 결과 문폴 내부의 압력 변동은 2차원적 특성을 지니고 있으며, 2차원 수치해석 결과와 정성적으로 잘 일치함을 확인하였다. 이를 바탕으로 압력 변동의 공간 분포에 POD 방법 및 조건부 평균을 적용한 결과, 문폴에 작용하는 압력 변동의 상당 부분은 자유 수면의 변동에서 기인하는 것이라기 보다 문폴의 전류 끝단에서 박리된 와류가 문폴의 후류 끝단에 충돌하는 유동 현상 때문임을 밝혔다.

### 참고 문헌

- Choi, S.-Y. Lee, Y.-G. Jeong, K.-L. & Ha, Y.-J., 2011. Reduction of Added Resistance by Internal Flow Control in the Moonpool of a Drillship. *Journal of the Society of Naval Architect of Korea*, 48(6), pp. 544-551.
- Jeong, J. & Hussain, F., 1995. On the Identification of a Vortex. *Journal of Fluid Mechanics*, 285, pp. 69-94.
- Kim, D.-J. Park, J.-W. Kim, J.-N. & Jeong, U.-C., 2006. An Experimental Study on the Moonpool Characteristics of a Cleaning Ship for Ocean Environment Purification. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 20(2), pp.46-51.
- Lee, S.B. Kang, W. & Sung, H.J., 2008. Organized Self-Sustained Oscillations of Turbulent Flows over an Open Cavity. *AIAA Journal*, 46(11), pp.2848-2856.
- Molin, B., 2001. On the Piston and Sloshing Modes in Moonpools. *Journal of Fluid Mechanics*, 430, pp. 27-50.
- Wilson, R.V. Stern, F. Coleman, H.W. & Paterson, E.G., 2001. Comprehensive Approach to Verification and Validation of CFD Simulations-Part 2: Application for Rans Simulation of a Cargo/Container Ship. *Journal of Fluids Engineering*, 123(4), pp.803-810.
- Yoo, J. & Choi, S.-H., 2004. Performance of Drillship with Moonpool and Azimuth Thrusters. *Journal of the Society of Naval Architect of Korea*, 41(6), pp.33-39.

